



**LANDSKAP TRÄDGÅRD JORDBRUK**

Rapportserie



## Beräkningsunderlag för dimensionering av plansiloväggar

### *Design criteria for structural design of silage silo walls*

**Hans von Wachenfelt, Christer Nilsson, Göran Östergaard, Anders Olofsson, Marie Karlsson**

Institutionen för biosystem och teknologi  
*Department of Biosystems and Technology*

Sveriges lantbruksuniversitet  
Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap

**Rapport 2013:16**

ISSN 1654-5427

ISBN 978-91-87117-47-3

Alnarp 2013





**LANDSKAP TRÄDGÅRD JORDBRUK**

Rapportserie

## Beräkningsunderlag för dimensionering av plansilovägg

### *Design criteria for structural design of silage silo walls*

**Hans von Wachenfelt, Christer Nilsson, Göran Östergaard, Anders  
Olofsson, Marie Karlsson**

Institutionen för biosystem och teknologi  
*Department of Biosystems and Technology*

Sveriges lantbruksuniversitet  
Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap

**Rapport 2013:16**

ISSN 1654-5427

ISBN 978-91-87117-47-3

Alnarp 2013



---

## FÖRORD

Det finns för närvarande ingen gällande standard för dimensionering av plansiloväggar för ensilage. Nuvarande beräkningar och konstruktionsutförande baseras på tidigare framtagna anvisningar. Dessa var avsedda för användning vid konstruktion av silovägg höjder om max 3 m.

Det fanns anledning att tro att dessa anvisningar överskattar krafterna och trycken, i huvudsak från pressvatten, som inträffar speciellt för siloväggar högre än 3 m. Detta kan resultera i överdimensionering, materialslöseri och ökade investeringskostnader.

Syftet med projektet var att ta fram exaktare underlag för dimensionering av plansilor, så att lantbrukarna får en produkt för säker lagring till ekonomiskt rimligt pris. Det övergripande målet med projektet var att bestämma ensilagens fysikaliska egenskaper som har betydelse för det horisontella väggtrycket och bestämma maximala pressvattentrycket hos silor med en vägg höjd om 3 m eller högre. Dataunderlaget skulle ligga till grund för utarbetande av nya beräknings- och konstruktionsanvisningar och en reviderad svensk standard.

Studien har finansierats av SLO-fonden, Stiftelsen Lantbruksforskning och Abetong AB via Partnerskap Alnarp. Projektets experimentella del har genomförts tillsammans med Abetong AB på kommersiella lantbruk i Götaland och har sammanställts av Hans von Wachenfelt vid Biosystem och teknologi (BT), Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp.

En projektgrupp med representanter från Biosystem och teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp och Abetong AB har svarat för utarbetande av förslaget till Svensk Standard.

Vi vill uttrycka vårt stora tack till SLO fonden, Stiftelsen Lantbruksforskning och Partnerskap Alnarp vid Sveriges lantbruksuniversitet för ekonomiskt stöd till projektet. Vi vill också tacka Anette Knutsson, Patrik Lennwall and Thorbjörn Berg med respektive personal för att vi fått möjlighet att utföra våra mätningar, Anders Prahl och Magnus Nilsson för tillverkning av mätstegar samt Jan-Erik Englund, SLU Alnarp för hjälp med statistisk bearbetning av datamaterialet.

Alnarp i juni 2013  
Christer Nilsson  
Professor

---

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	2
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	3
SAMMANFATTNING	4
SUMMARY	5
1 INTRODUCTION	6
1.1 Bakgrund	6
1.2 Problembeskrivning	6
1.3 Syfte och motivering	8
2 MATERIAL OCH METODER	9
2.1 Försökupställning	9
2.2 Mätssystem för mätning av siloväggtryck	9
2.3 Kalibrering av lastgivare	10
2.4 Rutiner och information från provplatserna	10
2.5 Mätningarnas genomförande	11
2.6 Statistisk databearbetning	11
3 RESULTAT	13
3.1 Pressvattenmätningar	13
3.2 Statiska och dynamiska trycklaster	13
3.3 Lastprofil ensilage	14
3.4 Lastprofil från packningsmaskin	16
4 DISKUSSION	17
4.1 Pressvatten	17
4.2 Statisk trycklast mot plansilovägg	17
4.3 Dynamisk trycklast mot plansilovägg	18
4.4 Slutsatser	18
5 NY STANDARD	19
5.1 Beräkningsmodell för dimensionering av plansiloväggar	19
5.2 Brottgränstillstånd	22
5.3 Bruksgränstillstånd, grundläggning och olyckslast	26
5.4 Förslag på beräkningavsnitt till plansilostandard	28
6 REFERENSER	31

---

## SAMMANFATTNING

Det finns idag ingen gällande standard för plansiloväggar för ensilage. Nuvarande beräkningar och konstruktionsutförande baseras på tidigare framtagna anvisningar (JBR). Dessa var avsedda för användning vid konstruktion av silovägghöjder om max 3 m. Det fanns anledning att tro att dessa anvisningar överskattar krafterna och trycken, i huvudsak från pressvatten, som inträffar speciellt för siloväggar högre än 3 m. Detta kan resultera i överdimensionering, materialslöseri och ökade investeringskostnader.

Det övergripande målet med projektet var att bestämma ensilagens fysikaliska egenskaper som har betydelse för det horisontella väggtrycket och bestämma maximala pressvattentrycket hos silor med en vägghöjd om 3 m eller högre. Dataunderlaget skulle utgöra grunden för utarbetande av nya beräknings- och konstruktionsanvisningar och en reviderad svensk standard. Målet var att minska investeringskostnaden för ensilagesilor.

Pressvattennivån mättes med hjälp av en mätsticka i 16 mm stålrör och mätsteg, vilka var placerade vertikalt längs siloväggens insida. Pressvattenmätningar utfördes under två säsonger i 24 silor, medan tryckprofiler mot siloväggen mättes vid inläggning av 10 gräs- och majsskördar under en säsong, med ungefär 400 tryckprofiler vid varje inläggning. En tryckprofil av det horisontella väggtrycket erhöles genom att lastgivare monterades på mätstegarna. Trycket mot lastgivarna registrerades genom ett datainsamlingssystem som visade statisk och total last (tryck utövat av ensilagemassan och packningsmaskinen). De statiska lasterna registrerades utan överfart av packningsmaskin och totaltrycken registrerades då en packningsmaskin passerade lastgivarna på mätstegarna. Skillnaden mellan den statiska och den totala lasten definierades som den dynamiska lasten.

Resultaten visar att pressvattennivån varierar avsevärt mellan skördar inom gården på grund av väderlek och geografisk placering i Sverige. Medelvärde av 24 maximalt uppmätta pressvattennivåer var 40 % av silohöjden. I en odränerad silo kvarstod pressvattennivån under lagringen. Pressvattennivån i silorna ökade väggtrycket 2 månader efter inläggning med ca 30 %, men pressvattennivåns inverkan på väggtrycket var endast statistiskt påvisbart 1 m från silobotten. Det statiska väggtrycket uppgick till 16 kPa vid inläggning respektive 22 kPa två månader efter inläggning i botten av silorna. Pressvattnet inverkade endast efter inläggning och samverkade inte med packmaskinen. Den dynamiska lasten angrep 0,5-1 m under ensilageytan mot siloväggen med ca 17 kPa vid en däcksbredd om 0,5 m och maskinvikt om 11,2 - 14,5 ton då fordonet kördes 0,1 m från siloväggen.

I avsnittet Ny Standard redogörs för hur det nya beräkningsförfarandet har tagits fram baserat på ovanstående mätresultat och normer från Eurokod både för Brottgräns- och Bruksgränstillstånd. I avsnittet jämförs dimensionerande moment baserat på äldre och nytt förslag till beräkningsförfarande. Vid inläggning i 4 m silo blir dimensionerande moment för packningsmaskin som huvudlast medan ensilaget som huvudlast blir dimensionerande för de lägre delarna av siloväggen i bruksskedet. Slutsats för Brottgräns- respektive Bruksgränstillstånd är att det dimensionerande momentet för 4 m plansilo beräknat enligt Eurokod blev 21 resp 15 % mindre än motsvarande beräkning enligt JBR. Det nya förslaget innehåller även krav på max sprickvidd om 0,3 mm för betongsilor. Vid dimensionering ska även hänsyn tas till grundläggning och olyckslast.

Nyckelord: plansilo, vägg, ensilage, tryck, kraft.

---

## SUMMARY

The national guidelines for design of silage bunker silo walls are not available today. The present calculation and design is based on previously issued guidelines (JBR). These were elaborated to be used in designing silo wall heights of maximum 3 m. There are reasons to believe that these guidelines overestimate the forces and pressures, mainly from silage juice, that are occurring especially for silo walls more than 3 m high. This could result in over-sizing, material waste and increased investment costs.

The aim of the project was to determine silage physical properties of importance for the horizontal wall pressure and evaluate maximum silage juice level of silos with a wall height of 3 m or more. The data should form a basis for new national design guidelines and a revised Swedish Standard. The ultimate goal was to lower the investment costs for silage bunker silos.

A pressure profile was acquired by means of transducers mounted on a steel ladder rack placed vertically along the inside silo wall. The pressure on the transducers was recorded by a data acquisition system displaying static and total load (pressures imposed by silage matter and compacting tractor respectively). The silage juice levels were determined by a measuring stick measuring the juice level inside slotted 16 mm steel pipes placed vertically along the silo walls. Additionally the juice level was recorded in the leg of the ladder rack.

Silage juice levels were measured during two seasons, all together in 24 silos, while pressure profiles were established during 10 grass and maize harvests in one season, resulting in approx. 400 pressure profiles at each harvest. The static loads were recorded with no tractor present and total loads as a tractor was passing in front of the transducer racks. The difference between the total and static load was defined as the dynamic load.

The results show that the silage juice level can vary between harvests within the farm due to weather conditions and geographic location. The mean of 24 measured peak levels was approx. 40 % of the silage height. A direct relation was found between grass silage juice level and silage dry matter. The silage juice level remained stable during the storage in undrained silos but could be radically redistributed between layers within the silo. The silo wall pressure increased by approx. 30% due to the silage juice level 2 months after harvest, but the juice level increase was only significant at 1 m from the silo bottom.

The static silo wall (4m height) pressure was 16 kPa during filling and compaction and 22 kPa at silo bottom 2 months after filling. The silage juice only had an effect after filling and was not interacting with compaction. The dynamic load was approx. 17 kPa when the vehicle passed 0.1 m from the silo wall. The load acting towards the silo wall was placed 0.5-1 m under the silage surface with a tyre width of the compacting tractor of 0.5 m and a machine weight of 11.2 - 14.5 ton.

The new guideline chapter describes the basis of calculation based on the above presented results and the Eurocode for both Ultimate limit states and Serviceability limit states. The design bending moment for Ultimate limit states and Serviceability limit states is 21 and 15 % less respectively compared to previous calculations according to JBR. The guideline demands a maximum crack width for concrete silos of 0.3 mm, additionally foundation and accident load are to be considered.

Key words: bunker silo, wall, silage, pressure, force.



---

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Bakgrund

Intresset bland lantbrukare för en ökad andel närproducerat foder blir större och större. Närproducerat foder kan också minska transportbehovet och därmed klimatbelastningen. En stor del av det grovfoder som används i nötkreatursbesättningar lagras i plansilor i form av ensilage baserat på vall eller fodermajs. En typisk plansilo består av en bottenplatta av betong med väggar av platsgjuten betong eller betongelement – eventuellt av trä. Vägghöjden har traditionellt varit 2 - 3 meter. Under senare år har det blivit mer och mer vanligt att bygga plansilor där väggen är 4 meter. Trenden är att göra den ännu högre. Investeringarna i plansilor inom det svenska jordbruket har mer än fördubblats den senaste 10 - årsperioden.

## 1.2 Problembeskrivning

Väggarna dimensioneras hållfasthetsmässigt huvudsakligen med hänsyn till de horisontalkrafter som uppkommer från ensilaget i samband med inläggning och förvaring. Dessutom måste de laster som packningsmaskinen ger upphov till medräknas. Vidare måste man ta hänsyn till den hydrostatiska lasten från pressvattnet. Storleken på denna senare last är helt beroende av till vilken nivå pressvatten kommer att uppstå. Detta tryck mot siloväggen blir det samma som det vattentryck man skulle få om motsvarande vattenmängd fanns i silon.

I samband med dimensioneringen av siloväggen och dess infästning i plattan kommer den uppskattade nivån på pressvattnet därför att få avgörande betydelse för utformning och materialmängder. Tidigare har i Sverige rekommendationer och anvisningar, LALT (LBS, 1983) respektive JBR (SJV, 1995) tillämpats vid hållfasthetsdimensioneringen. Dessa gäller inte längre. De var dessutom framtagna att gälla för silor med väggar upp till ca 3 meter. Emellertid kommer de fortfarande, i brist på andra relevanta anvisningar, till användning.

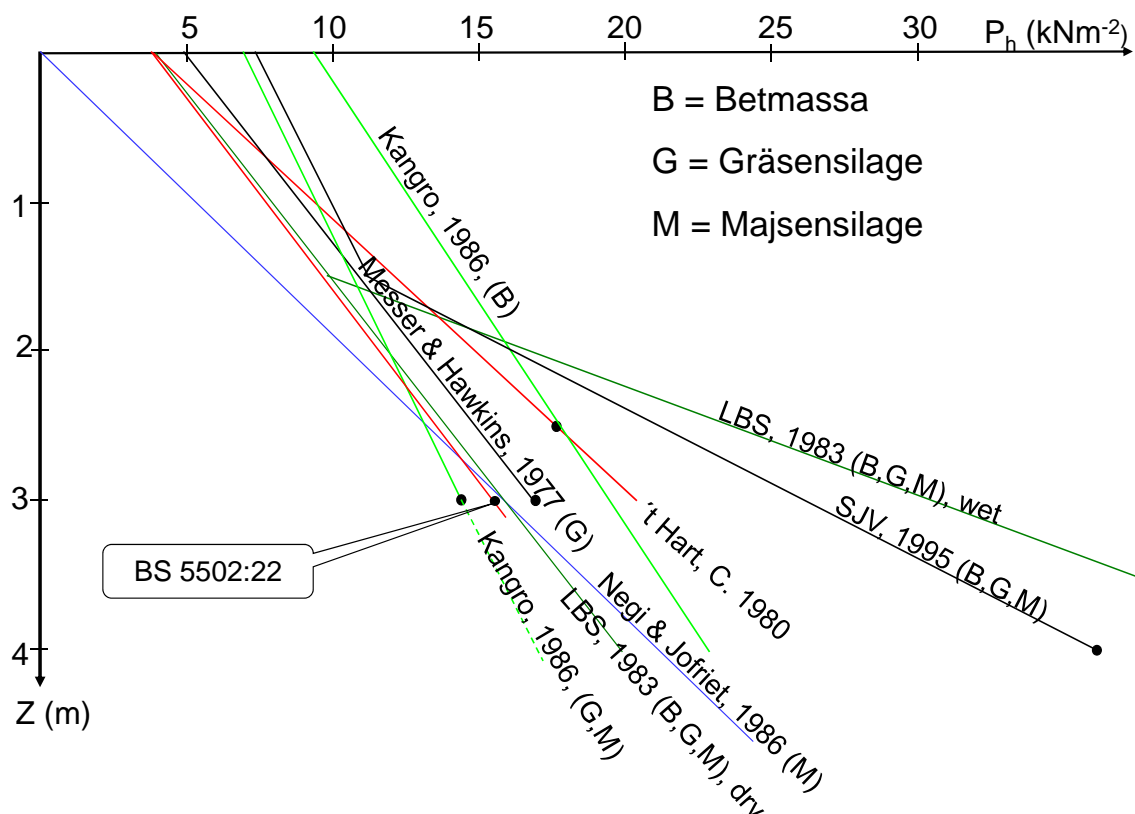
I dessa anvisningar anges att man, förutom lasten från själva ensilaget, skall räkna med ett tryck från pressvatten motsvarande det från vatten som har sin överyta 1,5 meter under maximal fyllningshöjd. Kravet på att man skall förutsätta denna höga pressvattennivå i samband med dimensioneringen baseras på mätningar gjorda i samband med inläggning i en silo med vägghöjden 2 meter (Kangro, 1986).

Det kan emellertid ifrågasättas hur generellt giltiga dessa mätvärden är. Effekten av denna tillskottslast har mindre betydelse vid lägre vägghöjd. Emellertid blir lasttillskottet avsevärt då vägghöjden blir uppåt 4 meter eller mer. Erfarenheterna från praktiken pekar dock på att trycktillskottet av pressvatten verkar vara överskattat. Avrinningen av pressvatten förefaller inte vara av denna storleksordning.

En jämförelse med utländska anvisningar och forskningsresultat (bl.a. Gruyaert et al., 2007; SJV, 1995; Kangro, 1986; LBS, 1983; Martens, 1993; Negi & Jofriet, 1986; Nilsson, 1982; Van Nuffel et al., 2008) visar också att de svenska dimensionerings-

anvisningarna, som tillämpas, anger att man skall räkna med extremt höga laster. Vidare kan man anta att det idag inte är samma storlek på de dimensionerande lasterna, eftersom vi har andra typer av ensilage och större packningsmaskiner.

Resultatet av den orienterande studien sammanfattas i figur 1, där några tillämpade anvisningar och rekommendationer sammanställts. Av figuren framgår att de svenska anvisningarna (SJV, 1995) föreskriver att man skall ta hänsyn till större laster än i utländska rekommendationer då siloväggen är mer än ca 2 meter hög. För en 4 meter hög silovägg skall man dimensionera för en last som i stort sett är dubbelt så stor som anges i andra källor.



Figur 1. Sammanställning av resultat från den inledande studien där olika anvisningar och rekommendationer för siloväggtryck sammanfattas. Vertikala axeln ( $z$ ) anger avstånd (meter) under ensilagens överyta; horisontella axeln ( $P_h$ ) anger horisontaltryck (kN/m<sup>2</sup>) mot siloväggen som uppmätts eller anges i olika anvisningar.

För närvarande pågår inom ramen för SIS (Standardiseringskommissionen i Sverige) ett arbete med att revidera standarden för plansilor, i vilken dimensioneringsanvisningar för plansilorna avses att tas in. För detta arbete krävs bättre underlag. Sammantaget tyder mycket på att de svenska dimensioneringsförutsättningarna är felaktiga. Lasten från pressvatten torde vara avsevärt lägre. Mera exakta och tillförlitliga värden måste fastslås genom mätningar i praktiken.

### **1.3 Syfte och motivering**

Projektets syfte var att ta fram exaktare underlag för dimensionering av plansilor, så att lantbrukarna får en produkt för säker lagring till ekonomiskt rimligt pris.

Målet med projektet var att bestämma fysikaliska egenskaper av betydelse hos ensilaget för horisontellt väggtryck och utvärdera maximalt förekommande pressvattennivå hos silor med en vägghöjd om 3 m eller högre. Resultaten skulle tjäna som underlag vid utarbetande av en reviderad svensk standard. Det slutliga målet var att minska investeringkostnaderna för plansilor.

Hypotesen var att nuvarande dimensioneringsanvisningar överskattar de belastningar som uppstår från ensilage och pressvatten.

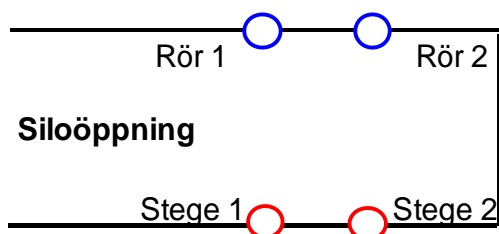
## 2 MATERIAL OCH METODER

### 2.1 Försöksuppställning

Pressvatten- och tryckmätningar utfördes i 10 plansilor med en vägghöjd av 3 m eller mer på gårdar i Västergötland, Skåne och Öland under 1:a till 4:e skörd av gräs- och majsensilage.

Bestämning av pressvattennivån gjordes med hjälp av tumstock i vertikalt placerade stålrör ( $\varnothing = \frac{3}{4}$ " ; slitsvidd ca 1,1 mm) i enskilda rör och mätstege, figur 2. Mätningarna utfördes under inläggning av ensilage i silon och under ca 2 månader efteråt. Genom att kombinera pressvatten- och tryckmätningar mot siloväggen under en längre tid efter inläggningen, kunde förändringar av vägghöjdet observeras över tiden.

För att erhålla en förklaring på det horisontella vägghöjdet och pressvattennivån registrerades packningsmetod, vikt hos packningsmaskin, ensilagens ts-halt och snittlängd.



a)

b)

Figur 2. Mätpunkternas placering i silon för pressvattenrör och mätstegar.

### 2.2 Mätsystem för mätning av siloväggtryck

Ett mätsystem, DataLink type NOS. DLK 900, Biometrics Ltd, UK, användes för att mäta det horisontella vägghöjdet mot siloväggen. Det bestod av två mätstegar, med 4 lastgivare på varje stege. Dessa stegar placerades invändigt längs siloväggen från silobotten till silons övre del. Lastgivarna (TEKSCAN FSR A401) som var förseglade med tätningsmassa och hade en tjocklek om mindre än 1 mm, klistrades och monterades vattentätt på mätstegen med 1,0 m intervall med start 0,05 m från silobotten.

Följande inställningar av de analoga givarna utfördes i mätprogrammet; känslighet (1 mV), antal mätningar per tidsenhet (0,1 per s), utgående spänning (1200 mV), mätområde (0-5 PSI). Givarkablarna sammanfördes i en underbox vilken skickade signalerna vidare till en AD-omvandlare/förstärkare. Mätsystemet var anslutet via USB-ingång till dator, där mätvärdena hanterades i ett mätprogram. Mätfilerna sparades i ASCII II format för vidare import i Microsoft Excel.

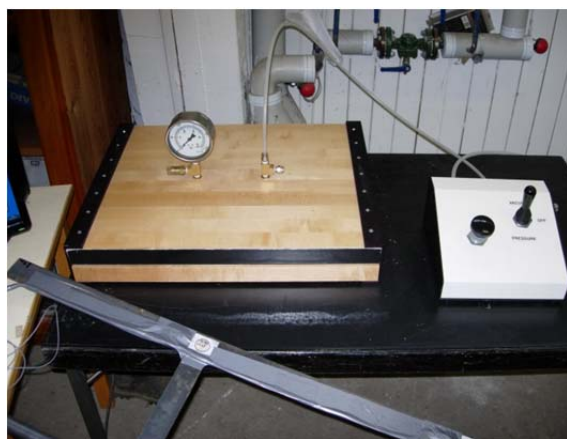
## 2.3 Kalibrering av lastgivare

Varje givare kalibrerades individuellt med en standardiserad 5 PSI 18" x 20" bälg PB5B (Tekscan), vid stegvis ökad belastning från 0 till 4,0 PSI i steg om 0,5 PSI, vilket motsvarar 0-28 kPa. En kalibreringsekvation togs fram till varje givare för konvertering av uppmätta värden till verkliga värden i PSI som sedan omvandlades till  $\text{kN/m}^2$  (kPa).

För att motstå pressvatten förseglades lastgivarnas anslutning till givarkabeln med silikon. Därefter kalibrerades givaren ytterligare en gång innan den monterades på mätstegen. Lastgivarna klistrades med dubbelhäftande tejp på plattjärnsdelen av stegen där sedan givaranslutning och kabel klistrades fast med silvertejp. Kabeldragningen längs stegen utfördes så att eventuell påkörning inte skulle riva med sig kablarna.



a)



b)

Figur 3. Montering av givare på mätstege (a) och kalibreringsbälgen varmed lastgivarna belastades vid olika tryck (b).

## 2.4 Rutiner och information från provplatserna

Uppgifter om hjulavstånd till silovägg, körriktning/överfart erhöles normalt genom att förare av packningsfordon signalerade vid start av packning invid silovägg och sedan fortsatte med packning längre och längre ut från siloväggen med körning spår invid spår. En annan variant var att övervaka packningmaskinen och därefter besluta om start av mätning. Överfarterna namngavs med uppgift om plats, tidpunkt, startpunkt relativt silovägg, ensilagehöjd, packningsmaskin och antal överfarter enligt Kangro (1986). Ett protokoll fördes parallellt där uppgifter om vilken typ av packningsmaskin (däcksbredder och vikt), ensilaget ts-halt, mognadstadium etc skrevs in. Dessutom antecknades hur mätningarna fungerade samt om något speciellt inträffade.

En mätserie inleddes med en registrering av enbart statisk last. Därefter registrerades ett antal förbifarter av packningsmaskinen för att avslutas med en mätning enbart av den statiska lasten igen. Kriterien för en godkänd mätserie var att den statiska lasten från första och sista mätningen i mätserien var lika (Kangro, 1986).

## 2.5 Mätningarnas genomförande

Pressvattennivån bestämdes vid samtliga mättillfällen. Med de vertikalt monterade lastgivarna registrerades det statiska trycklasten mot silovägg på olika nivåer både vid inläggning av ensilaget och efter att silon var fylld. Den totala lasten från ensilagemassan och från passerande packningsmaskin registrerades av lastgivare på olika nivåer under inläggningen.

Den registrerade lasten då packningsmaskinen passerade betecknades som total last ( $Q_{\text{tot}}$ ) och den registrerade lasten utan packningsmaskin i närheten betecknades som statiska lasten ( $Q_{\text{stat}}$ ). Extralasten från packningsmaskinen ( $Q_{\text{dyn}}$ ) är då:  $Q_{\text{dyn}} = Q_{\text{tot}} - Q_{\text{stat}}$

Ensilage fylldes i silon och packades i skikt om ca 0,25 m åt gången fördelat över hälften av siloytan. Packningen utfördes genom att packningsmaskinen körde spår vid spår över ytan 2-4 gånger för varje ensilageskikt. En mätserie utfördes för varje ensilageskikt vid inläggningen. Under varje mätserie registrerades hundratals statiska lastvärden tillsammans med maximivärden från ensilage och packningsmaskin vid olika avstånd från siloväggen och vid olika ensilagehöjder över lastgivarna vilket resulterade i en lastprofil för siloväggen. De statiska lastvärdena resulterade i en lastprofil och maximivärden från packningsmaskinen, då hjulaxlarna var mitt för mätstegen, resulterade efter beräkningar i en lastprofil. De dynamiska mätvärdena grupperades efter siloväggavstånd.

Packningsmaskinernas vikt var 11,2 och 14,5 ton och däckbredden 0,5 m. Gräsenkilagets ts-halt var 24 % vid ett tillfälle och 27-29 % för de övriga samt 39 % för majsensilaget. Under de efterföljande månaderna utfördes eftermätning av statisk last ( $Q_{\text{stat}}$ ) mot siloväggen. Samtidigt mättes pressvattennivån i dessa silor.

## 2.6 Statistisk databearbetning

Råvärdena importerades från mätprogrammet till Microsoft Excel och översattes via en mall till verkliga värden i PSI som sedan omvandlades till kN/m<sup>2</sup> (kPa).

Matrisen med mätvärden undersöktes sedan i tidsföljd efter statiska- och totallastvärden (då packningsmaskinen passerade lastgivarna). För varje lastgivare beräknades medelvärde och standardavvikelse för det statiska området ( $n = 100-300$ ), där SD-värdet som regel var mindre än 0,1. Efter att ha lokaliserat totallasten för den enskilda överfarten av packmaskinen i matrisen fick fem mätvärden återge det lokala maxvärdet. Anledningen till detta var att försäkra sig om att det inte rörde sig om temporärt mätfel hos lastgivaren.

De statiska lastvärdena från de enskilda mätserierna sammanställdes till en statisk lastprofil för hela mätförloppet per silo. Eftermätningarna av  $Q_{\text{stat}}$  behandlades på samma sätt som lastvärdena vid inläggning i silon.

Det dynamiska lastvärdet ( $Q_{\text{dyn}}$ ) beräknades för var och en av de fem totallastvärdena genom subtraktion av motsvarande statiskt lastvärde. Därefter beräknades ett medelvärde av de fem  $Q_{\text{dyn}}$  värdena. För var lastgivare sammanställdes ett maxvärde för var halvmeter ensilagemassa över givaren vid olika avstånd för packningsmaskinen till siloväggen (0,1-1,5 m). De olika givarnas maxmedelvärden sammanställdes till en  $Q_{\text{dyn}}$  matris för samtliga silomätningar ( $n_{\text{tot}} = 6431$ ).

För lastvärdena från  $Q_{\text{dyn}}$  och  $Q_{\text{stat}}$  vid inläggning samt  $Q_{\text{stat}}$  vid eftermätning beräknades en 95 % percentil för lastvärdena på samma nivå under ensilageytan och därefter en trendkurva dragen genom 95 % percentilerna. Genom logaritmering av  $Q_{\text{dyn}}$  maxvärdena, uppdelade på olika avstånd från silovägg, erhöles normalfördelning och det blev möjligt att anpassa en regressionslinje. Lastvärdena transformerades sedan tillbaka via exponentialfunktionen. Likaledes beräknades 95 % percentil för  $Q_{\text{dyn}}$  på regressionslinjen som sedan transformerades tillbaka via exponentialfunktionen.

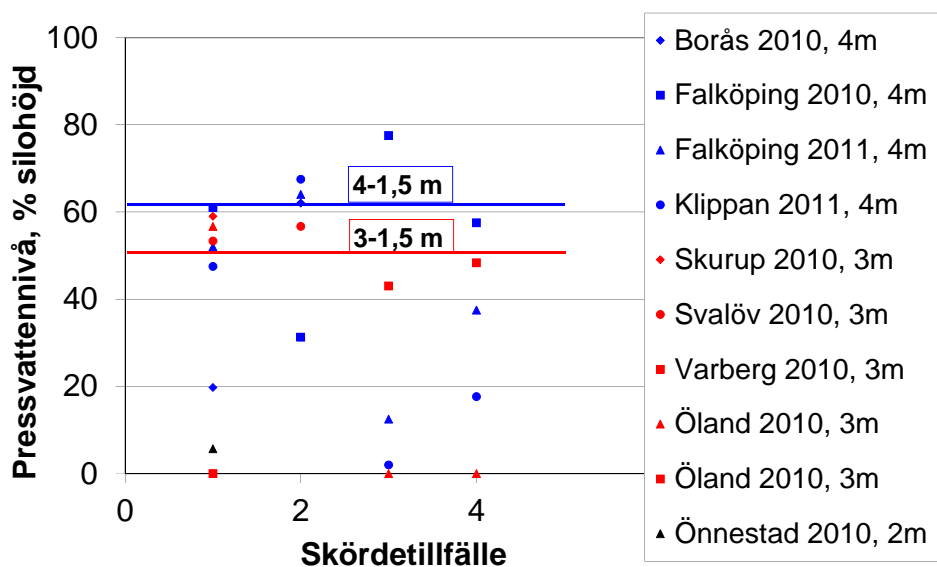
Lastvärdena från  $Q_{\text{stat}}$  eftermätning provades om de påverkats av pressvatten. Datamaterialet delades upp i två grupper, där den ena halvan hade pressvatten och den andra inte hade det. För varje nivå användes ett t-test för att undersöka om det var någon signifikant skillnad mellan de båda grupperna. En signifikansnivå om 5 % användes i analysen.

## 3 RESULTAT

### 3.1 Pressvattenmätningar

Pressvattenmätningar utfördes under två säsonger, i totalt 24 silor. I fem silor ökade och omfördelades pressvattennivån under de 3 första månaderna efter fyllning. Pressvattennivån kvarstod till 90 % i de öppnade silorna.

Medelvärdet av pressvattennivån var 40 % av siloväggshöjden för de 24 silorna som ingick i 2010 och 2011 års mätningar. Den högsta nivån om 78 % registrerades i en silo. Den högsta dimensionerande pressvattennivån om 1.5 m efter inläggning enligt Kangro (1986), överskreds i 4 och 3 fall för 3 respektive 4 m silohöjd. Medelvärdet för de 7 silorna som ingick i eftermätningarna 2011 var en pressvattenhöjd om 43 % av siloväggshöjden. Ett direkt förhållande erhöles mellan ensilagens ts-halt och pressvattennivån, ju högre ts-halt ju lägre pressvattennivå (von Wachenfelt & Nilsson, 2012).



Figur 4. Maximalt uppmätta pressvattennivåer under 2010 och 2011. Varje punkt representerar ett medelvärde av 6-10 mätningar i var silo. Röd och blå linje markerar förväntad maxnivå av pressvatten för 3 m (röd) respektive 4 m (blå) siloväggshöjd enligt Kangro (1986).

### 3.2 Statiska och dynamiska tryckklaster

Mätning av lastprofiler utfördes vid inläggning av gräs- och majsensilage i 10 silor under en säsong, med ca 400 lastprofiler vid varje inläggning. Figur 5 visar exempel på en statisk lastprofil och tilläggslasten från packningsmaskiner. Den statiska lastprofilen är resultatet av lasten mot siloväggen från ensilagemassa och pressvatten, men inget pressvatten registrerades vid inläggningen.

Vid denna mätning tog det 3 månader för pressvattnet att nå en maximinivå om 50 % av silohöjden. Tilläggslasten från packningsmaskinen hade störst verkan inom den första metern under fordonet då maskinen passerade 0,1 m från siloväggen.



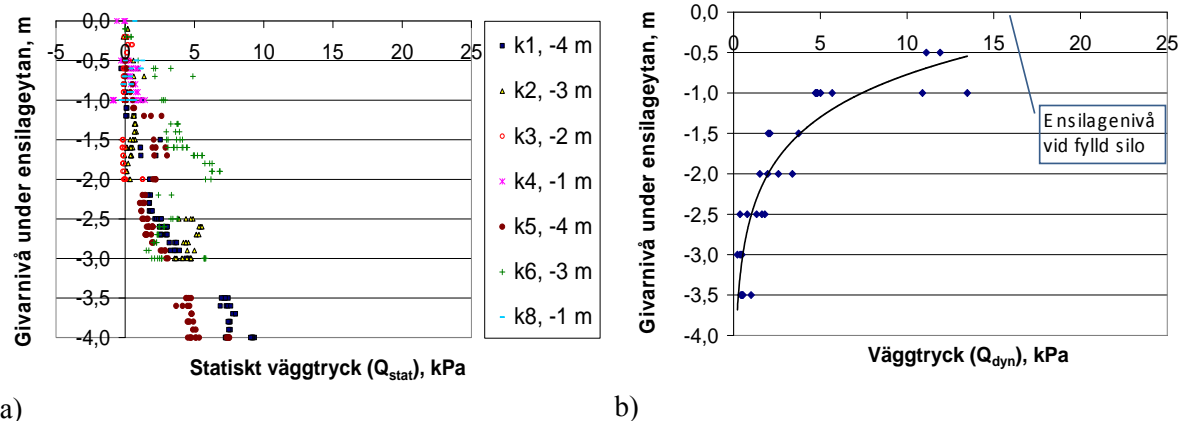
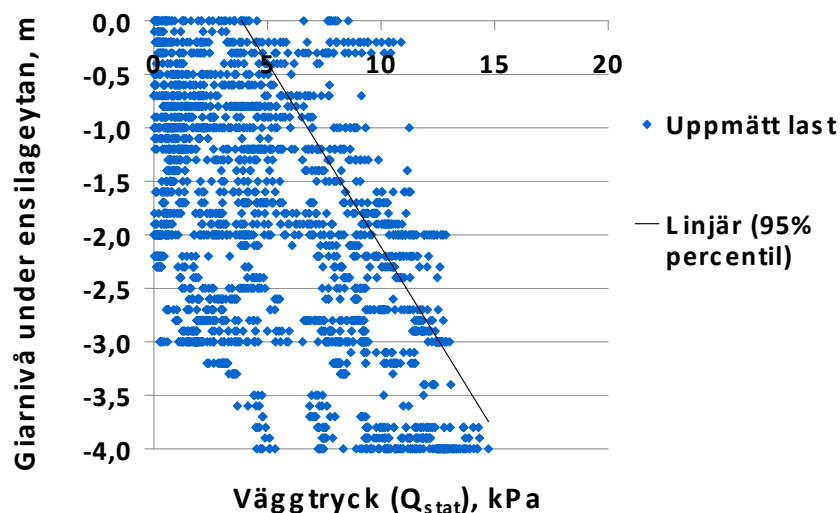


Figure 5. a) Exempel på statisk lastprofil mot en silovägg i en 4 m hög plansilo vid inläggning av första skörd av gräs med 27 % ts-halt och 591 registrerade mätningar från 7 lastgivare, vars placering anges relativt ensilageytan.

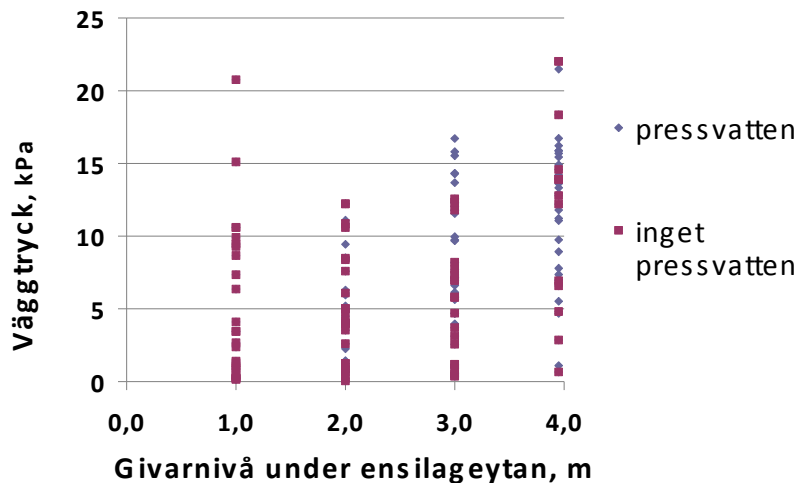
b) Tilläggslasten ( $Q_{dyn}$ ) från packningsmaskiner (11,2-14,5 ton) sammanställd från mätningar i 4 m silor. Registrerade måtvärden visar då packningsmaskinen passerade 0,1 m från siloväggen vid olika höjder ovanför lastgivarnas position.

### 3.3 Lastprofil ensilage

Mätresultat från fyra inläggningar av gräs- och majsensilage utgjorde basen för en total lastprofil för  $Q_{stat}$  ( $n=2543$ ), där 95 % percentilen beräknades för de enskilda lastnivåerna. En trendlinje dragen genom 95 % percentilerna visar hur stor last siloväggen med 95 % sannolikhet minst blir utsatt för. Maximal  $Q_{stat}$  blev 16 kPa (på 4 m djup).

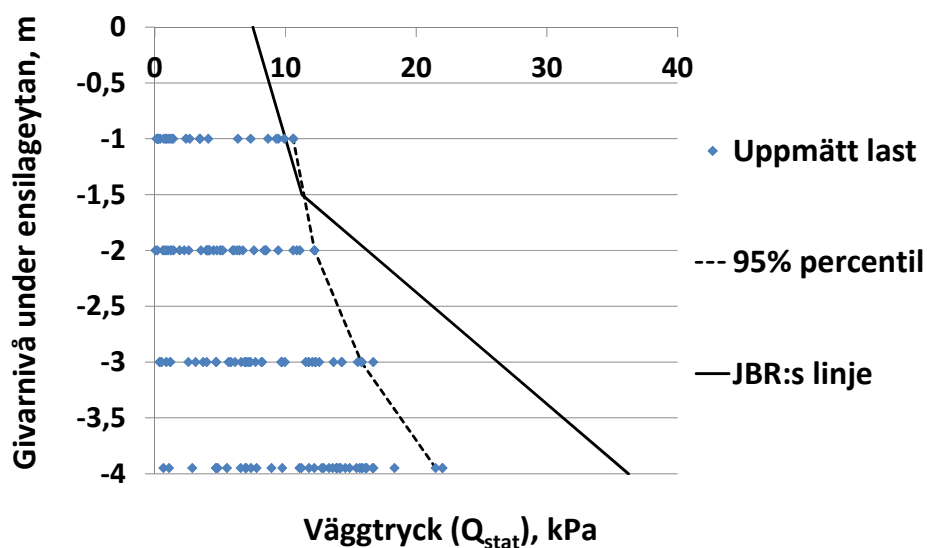


Figur 6. Samtliga statiska lastprofiler från inläggningsskedet i silorna samlade i en figur ( $n=2543$ ), där en trendlinje dragits genom enskilda 95 % percentiler.



Figur 7. Siloväggtryck ( $Q_{\text{stat}}$ ) från ensilagemassan uppmätt vid eftermätningar (upp till 4 månader efter inläggning) då pressvatten utvecklats ( $n = 223$ ). För 3 m nivå fanns statistisk signifikans för att pressvattennivån påverkade siloväggtrycket.

Vid mätning av  $Q_{\text{stat}}$  efter inläggning framkom att pressvattennivåerna ökade efterhand. En effekt av pressvatten på siloväggtrycket kunde statistiskt påvisas för lastgivarna på 3 m nivå, men inte för övriga nivåer.

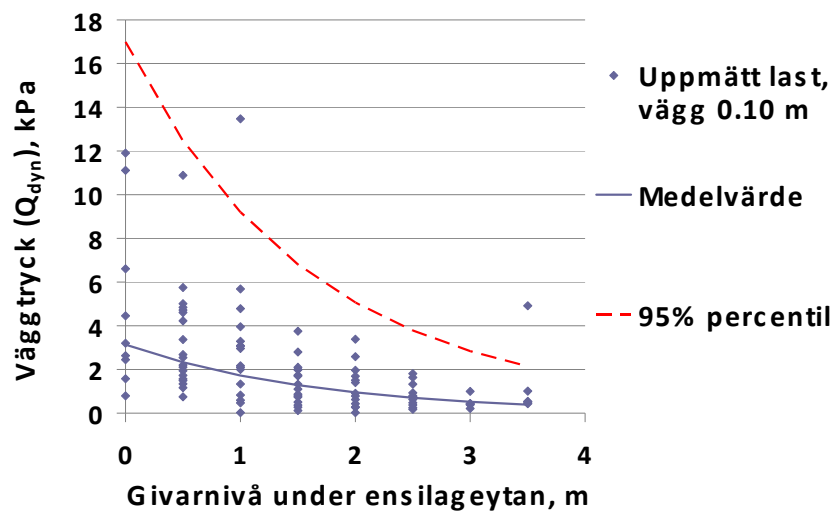


Figur 8. Samtliga statistiska lastprofiler uppmätta efter inläggningsskedet ifrån 7 silor samlade i en figur ( $n=151$ ), där en streckad linje dragits genom de enskilda 95 % percentilerna per givarnivå. Den heldragna linjen anger JBR's linje (SJV, 1995).

Vid beräkning av 95 % percentiler för de sammanställda eftermätningensvärdena ( $n=151$ ) till en total lastprofil påvisades att  $Q_{\text{stat}}$  vid eftermätningarna från 7 silor var högre än  $Q_{\text{stat}}$  vid inläggning, + 56 % på 1 m, +36 % på 2 m, +24 % på 3 m och +37 % på 4 m under ensilageytan. I figur 8 finns även inlagd lastlinjen för de tidigare svenska anvisningarna JBR (SJV, 1995) som jämförelse.

### 3.4 Lastprofil från packningsmaskin

Av de olika lastprofilerna från packningsmaskin ( $Q_{dyn}$ ) visade sig den med minst avstånd (0,1 m) till siloväggen ge högst värden, varför de övriga ej återges här. Lasten är som högst 0,5-1 m under ensilageytan för att sedan klinga av nedåt i ensilagemassan. Lasten från packningsmaskinen uppför sig likvärdigt vid inläggning av ensilage från silobotten till dess att silon är fylld. Då silon är fylld utövar lasten från packmaskinen störst påkänning på siloväggen. En trendlinje dragen genom 95 % percentilerna visar hur stor last siloväggen med 95 % sannolikhet maximalt blir utsatt för, dvs då lastvärdena befinner sig under linjen. Maximal  $Q_{dyn}$  enligt 95 % percentilen blev 17 kPa och totalt antal registrerade maxvärden för samtliga nivåer var 6431.



Figur 9. Uppmätta tillskottslaster ( $Q_{dyn}$ ) vid passage av packningsmaskin på 0,10 m avstånd från silovägg. Den heldragna linjen anger medelvärde för uppmätta laster och den streckade trendlinjen 95 % percentil (n=96).

---

## 4 DISKUSSION

### 4.1 Pressvatten

Pressvattennivån i silor kan variera kraftigt mellan skördar inom samma gård och på grund av geografisk ort. Om variationer i ts-halt vid skörd är större i Skandinavien jämfört med övriga Europa vet vi inte men det är troligt att vi periodvis har större nederbörd och perioder med temperaturer där det tar längre tid att erhålla en ökad ts-halt vid skörd, dvs upptorkning efter regn, speciellt fram på hösten.

Pressvattenmängden i en silo beror på ensilagens ts-halt, tryck och packning i silon, fibermaterial, hackelselängd och förtorkning av grödan. Ts-halten i sin tur påverkas av sortval, mognadstadium, gödsling, dagg och nederbörd (Stewart & McCullough, 1974). O'Donnell (1993) anger att pressvattenmängd och dess flöde är helt beroende av silokonstruktion och dess dräneringssystem. Faktorer som bestämmer dräneringsflödet från silon är trycket inom silon, materialets genomsläpplighet och om det finns dräneringskanaler eller inte. Typiska mängder pressvatten från gräsensilage vid 18 % ts är 150 l/ton (Stewart & McCullough, 1974). Gräsensilage ensilerat i plansilo med en ts-halt över 30 % producerar inget eller mycket lite pressvatten (Bastiman, 1976).

Ett nära samband mellan pressvattenmängder och ts-halt har konstaterats i tidigare undersökningar (Bastiman, 1976; Sutter, 1955), vilket också framkom i denna studie. Att pressvattnet till stora delar verkar stå kvar i silon under lagringstiden, dvs att endast en mindre mängd läcker ur silofacket på framsidan av silon, verkar helt foljdriktigt enligt O'Donnell (1993) då ingen dränering fanns i de silor som ingått i studien.

I tidigare svenska anvisningarna JBR (SJV, 1995) var den högsta dimensionerande pressvattennivån efter inläggning 1,5 m under ensilageytan. Denna nivå överträffades dock i 44 och 21% för 3 respektive 4 m silor i nuvarande försök. Under 2011 ökade och omfördelades pressvattennivån under de första månaderna efter inläggning i 55 % av mätningarna. Giltigheten av de pressvattennivåer som anges av Kangro (1986) kan vara tveksamma vid jämförelse med ovanstående resultat, då Kangros mätningar endast utfördes under inläggningen av ensilage och inte omfattade efterföljande lagringsperiod.

### 4.2 Statisk trycklast mot plansilovägg

Eftermätningar av det statiska trycket och pressvattennivåer i silor under 2012, visade att pressvattennivåerna inte nådde maximal nivå förrän efter ett antal månader. Dessutom existerade det inget pressvatten vid inläggningstillfället utom i 1 fall av 10.

Den resulterande statiska lastprofilen vid inläggning i silorna (figur 6) överensstämde med Kangros (1986) mätningar, dvs. en linjär ökning av väggtrycket med djupet. En mindre avvikelse finns i topplagret av silon, men den försvann vid eftermätningarna. Det högre statiska lastvärdet vid eftermätningarna låg inom samma tryckområde som erhållits vid mätningar av majsensilage i Canada för motsvarande silohöjd (Zhao & Jofriet, 1991).

Medelvärdet av pressvattennivån för de sju silor där eftermätningar utfördes låg strax över medelvärdet för samtliga 24 pressvattennivåmätningar. Tryckökningen på grund av pressvattentryck mot siloväggen vid eftermätningarna kan därmed sägas vara representativ för datamaterialet. Men tryckökningen mot siloväggen var endast statistiskt påvisbar för pressvatten vid 1 m från silobotten, ej för övriga nivåer. Med ett större dataunderlag hade förmodligen även pressvatten kunnat påvisas med större noggrannhet upp till de uppmätta nivåerna.

#### **4.3 Dynamisk trycklast mot plansilovägg**

Den dynamiska lastprofilens kraftigt avtagande tendens med djupet från ensilageytan överensstämmer med tidigare resultat (Kangro, 1986; Zhao & Jofriet, 1991). I dessa båda fall har lasten avtagit till att bli obetydlig vid 2 m silodjup.

I Kangros (1986) mätningar var tyngden hos packmaskinen 7,5 ton och däckbredden 0,5 m vilket gav en maximal dynamisk last om 17 kPa vilket motvarade 13.3 kN i två punktlaster på 0,5 m djup under ensilageytan. I Zhao & Jofriets (1991) undersökning användes en bandtraktor om 21 ton med 3 m långa och 0,5 m breda band. Där hamnade den dynamiska maximala lasten på 10 kPa vid ett avstånd om 0,23 m från siloväggen på ett djup av 0,76 m under siloytan. Messer & Hawkins (1977) erhöll maximal dynamisk last vid inläggning motsvarande en punktlast om 5,9 kN på 0,75 m djup och 0,006 m från siloväggen med en 5,4 tons traktor. Storleken på den maximala dynamiska lasten och dess utbredning i nuvarande undersökning verkar överensstämma med tidigare studier.

#### **4.4 Slutsatser**

- Metodiken att mäta pressvatten och siloväggtryck i plansilor vid inläggning samt 2-3 månader efter inläggning fungerade. Mätvärden kan gå förlorade på grund av påkörning av mätutrustning. Med ett större dataunderlag hade förmodligen pressvattentryck för samtliga uppmätta nivåerna kunnat påvisas.
- Pressvatten står till stora delar kvar i silon under lagringstiden och kan omfördelas radikalt mellan olika skikt i silon, dvs. det kan vara svårt att mäta vid få tillfällen under kort tid.
- Medelvärdet av maximalt registrerad pressvattennivå uppgick till ca 40 % av silohöjden.
- Det maximala statiska väggtrycket uppgick till 16 kPa vid inläggning respektive 22 kPa två månader efter inläggning i botten av 4 m silorna.
- Pressvattentrycket i silorna ökade väggtrycket 2 månader efter inläggning med ca 30 % men var endast statistiskt påvisbart 1 m från silobotten.
- Pressvattnet inverkade endast efter inläggning och samverkade inte med packmaskinen.
- Den dynamiska lasten angrep 0,5-1 m under ensilageytan mot siloväggen med ca 17 kPa vid en däckbredd om 0,5 m och maskinvikt om 11,2-14,5 ton.

## 5 NY STANDARD

### 5.1 Beräkningsmodell för dimensionering av plansilovägg

Utgående från genomförda fältförsök redovisas nedan ett förslag till ny beräkningsmodell för plansilo baserad på 20-årslast. Jämfört med Jordbruksverkets byggråd, JBR (SJV, 1995) kan följande noteras:

- Pressvattnet har endast inverkan efter inläggning, och samverkar inte med packningsmaskinen,
- Packningsmaskinens inverkan på väggens belastning är ifrån nivå 0,5 m under plansiloväggens övre kant,
- I föreslagen beräkningsmodell betraktas ensilaget som en permanent last, att jämföra med JBR (SJV, 1995) där ensilaget betraktas som en variabel last.

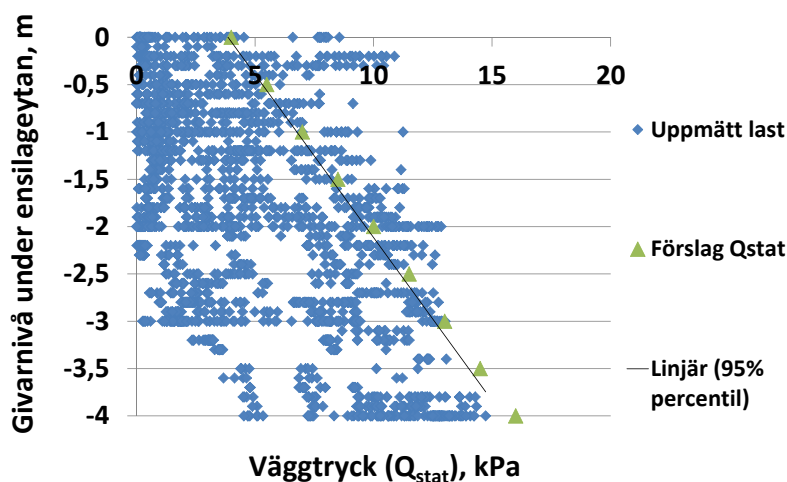
#### Brottgränstillstånd

Med utgångspunkt ifrån ovanstående så krävs kontroll av brottgränstillstånd för två stadier:

- Stadie 1 (inläggning):  $Q_{\text{stat}} + Q_{\text{dyn}}$ 
  - $Q_{\text{stat}}$  – ensilagelast utan pressvatten
  - $Q_{\text{dyn}}$  – packningsmaskin
- Stadie 2 (bruksskedet):  $Q_{\text{stat}}$ 
  - $Q_{\text{stat}}$  – ensilagelast med pressvatten

#### **Stadie 1, ensilagelast ( $Q_{\text{stat}}$ ) utan pressvatten**

För beräkning av  $Q_{\text{stat}}$  – exklusive pressvatten, är kravet att den dimensionerande lasten ska ligga till höger om trendlinjen för 95 % percentil, vilket uppfylls med ekvationen  $Q_{\text{stat}} = 4 + 3x$  (kPa, gröna trianglar), där  $x = 0$  för plansilons övre krön.



Figur 10. Visar ensilagelasten  $Q_{\text{stat}}$  i stadie 1 med linjär 95 % percentil. Kravet är att dimensionerande last ska ligga till höger om linjen, vilket motsvarar de gröna trianglarna.

### Stadie 1, packningsmaskin ( $Q_{dyn}$ )

I samband med försöken har följande packningsmaskiner använts: Volvo lastmaskin L70C med grep, 10 500 kg; Claas Axion 850, 12 086 kg; Fendt 960 Vario, 14 500 kg; John Deere 8520/8420 å 11 172 kg; Cat 924G med grep = 10 360 kg.

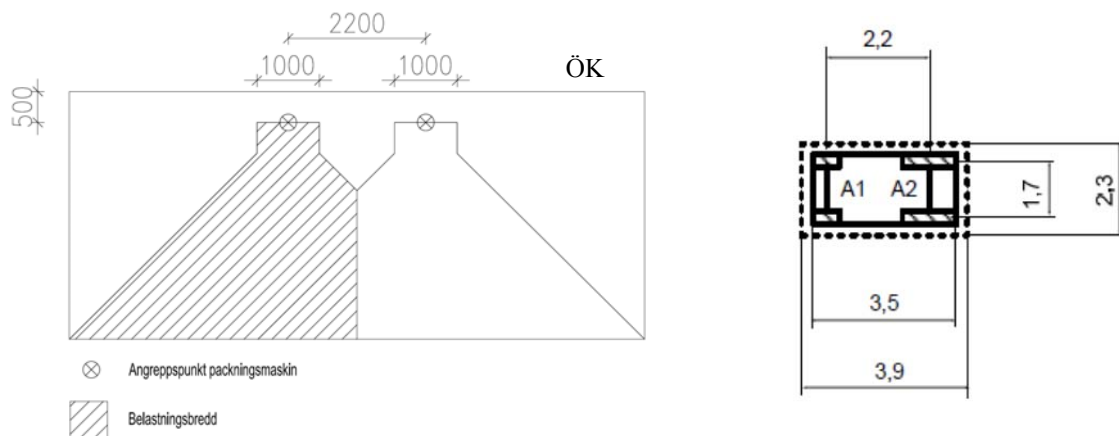
Enligt JBR (SJV, 1995) skall hänsyn tas till packningsmaskinen genom två punktlaster å 0,1 \* egenvikten hos packningsmaskin, med ett axelavstånd om c/c 2,5 m. Angripande last beräknas uppstå 0,6 m ifrån plansiloväggens övre kant (ÖK).

Försöken visar att packningsmaskinens inverkan är ifrån nivå  $z = 0,5$  m, se figur 11. Den beräknade belastningen utgår från en packningsmaskin, eftersom inverkan från flera maskiner kan anses försumbar då avståndet dem emellan gör att lasten ”klingar” ut. Packningsmaskinen närmast silovägg ger dimensionerande last. Det är dock svårt att bedöma packningsmaskinens inverkan fullt ut med tanke på maskinens fyra hjul och antal packningsmaskiner. Mätningar är utförda på olika distans ifrån plansilovägg, 10 cm, 20 cm etc.

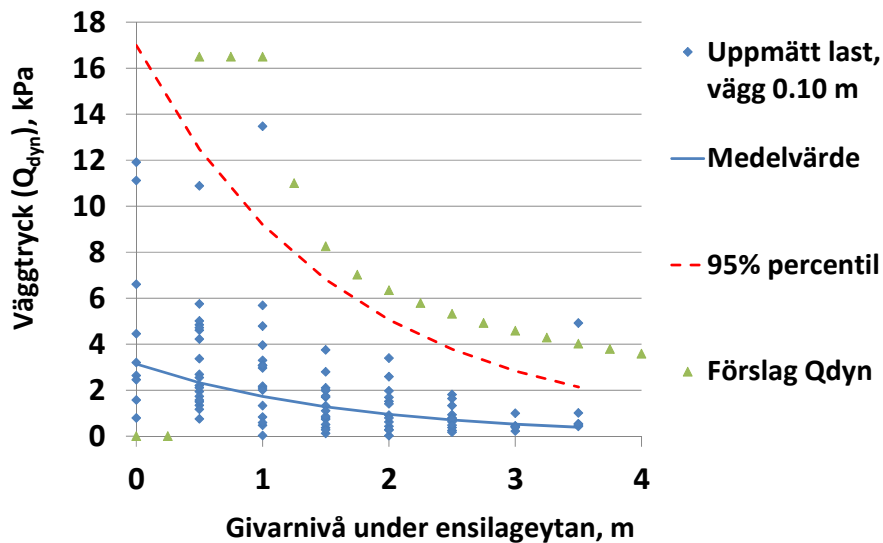
Förslag på ny beräkningsmodell för packningsmaskin är att:

- Beräkningsmodellen utgår ifrån laster 10 cm från plansilovägg,
- Två punktlaster å 0,15\* egenvikt hos packningsmaskin,
- c/c 2,2 m mellan punktlasterna, dvs. axelavståndet, se figur 11b,
- Punktlasten angriper 0,5 m under ÖK, se figur 11a,
- Lastspridningsbredd  $\geq 1,0$  m,
- Lastspridning i plansilovägg 1:1,
- Överlappande lastspridning är ej tillåten.

Medelvikten på packningsmaskinerna i försöket var ca  $P=11$  ton.



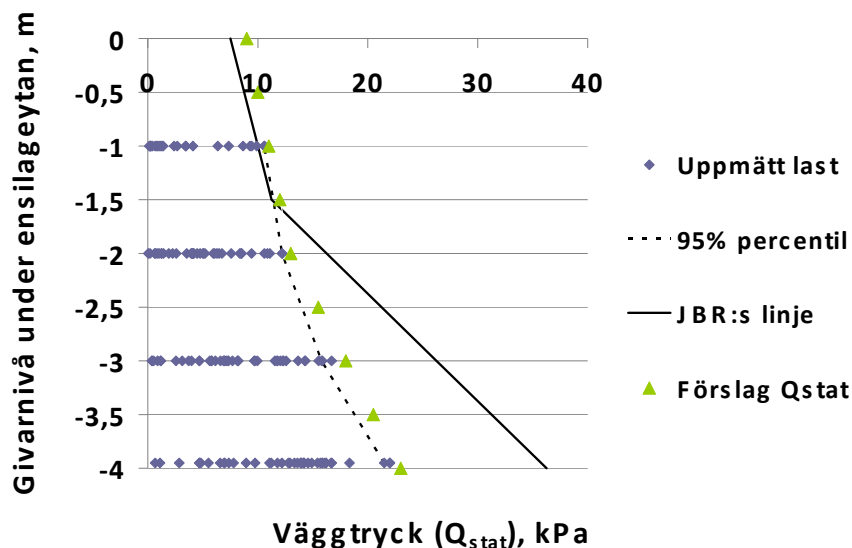
a) b)  
Figur 11. Lastspridning nedåt i ensilagemassan från packningsmaskin med angreppspunkt 0,5 m under siloväggens överkant (ÖK) (a) med givna dimensioner hos packningsmaskin (b).



Figur 12. Figuren visar belastningen från packningsmaskin 10 cm ifrån vägg. Maxmedelvärden beräknades för var 0,5 m ensilagehöjd för samtliga lastgivare. Streckad linje avser 95 % percentil och de gröna triangelarna motsvarar  $0,15 \cdot$  egenvikten hos packningsmaskinen med minsta lastbredd = 1,0 m och med en lastspridning 1:1. Vid beräkning av lastbredd har hänsyn tagits så att överlappning av last ej erhålls.

### Stadie 2, ensilagelast ( $Q_{stat}$ ) med pressvatten

För beräkning av  $Q_{stat}$  – med pressvatten, är kravet att den dimensionerande lasten ska ligga till höger om 95 % percentil, vilket uppfylls med ekvationen  $Q_{stat} = 9 + 2x$  (kPa, gröna trianglar), för  $x \leq 2$ , dvs. för plansilons övre del, och  $Q_{stat} = 13 + 5(x - 2)$  (kPa), för  $2 < x \leq 4$ .



Figur 13. Visar ensilagelasten  $Q_{stat}$  i stadie 2 med linjär 95 % percentil. Kravet är att dimensionerande last ska ligga till höger om linjen, vilket motsvarar markeringen med gröna trianglar.



## 5.2 Brottgränstillstånd

### 5.2.1 Laster och lastkombinationer i plansilor enligt Eurokod

I Eurokod 0 (Eurokod, 2004) definieras fyra olika typer av brottgränstillstånd som skall verifieras när det är relevant för situationen i fråga. Dessa redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Olika typer av brottgränstillstånd enligt Eurokod 0 (Eurokod, 2004).

Beteckning i Eurokod 0	Beskrivning
EQU (Equilibrium)	Förlorad statisk jämvikt för bärverket (eller del av det) betraktat som stel kropp.
STR (Structure)	Inre brott eller deformation av bärverket (eller del av det), där materialhållfasthet är avgörande.
GEO (Geo stability)	Brott eller för stor deformation i undergrund, där hållfasthet i jord eller berg är avgörande.
FAT (Fatigue)	Brott genom utmattning hos bärverket (eller del av det).

### Laster och lastkombinationer för plansilo enligt Eurokod 0.

Ensilage betraktas som en *permanent last*.

Packningsmaskinen betraktas som en *variabel last*,  $\psi_0 = 1,0$ .

Jordtryck på plansilovägg betraktas som *permanent geoteknisk last*.

Last av fordon utanför plansilo betraktas som *variabel geoteknisk last*.

Beräkning sker i säkerhetsklass 1 ( $\gamma_d = 0,83$ ).

#### Fylld plansilo utan jordtryck:

Lastkombination STR/GEO Uppsättning B ekvation 6:10a respektive b kontrolleras. Då packningsmaskinen har  $\psi_0 = 1,0$  är det ekvation 6:10a som är dimensionerande.

#### Fylld plansilo med jordtryck:

Lastkombination STR/GEO Uppsättning B ekvation 6:10a respektive b kontrolleras med jordtryck enligt STR/GEO ekvation 6:10 Uppsättning C (gynnsamt värde). Hänsyn skall även tas till eventuell fordonstrafik utanför plansilon.

#### Tom plansilo med jordtryck:

Lastkombination STR/GEO Uppsättning B ekvation 6:10a respektive b kontrolleras med jordtryck enligt STR/GEO ekvation 6:10 Uppsättning C (ogynnsamt värde). Hänsyn skall även tas till eventuell fordonstrafik utanför plansilon.

### 5.2.2 Resultat brottgränstillstånd

I det följande görs en jämförelse mellan JBR (SJV, 1995) och föreslagen ny beräkningsmodell. Då säkerhetsklass 1 har valts så erhålls samma materialhållfastheter för både beräkning enligt JBR och Eurokoder. Således kan dimensionerande laster jämföras rakt av.

Enligt JBR så gäller följande:

Laster

Horisontaltryck,  $q_{hk}$  på silovägg

Lasten betraktas som variabel med  $\psi = 1,0$

$$q_{hk} = 7,5 + 2,5 * z \quad \text{kN/m}^2 \text{ för } 0 < z < z_0$$

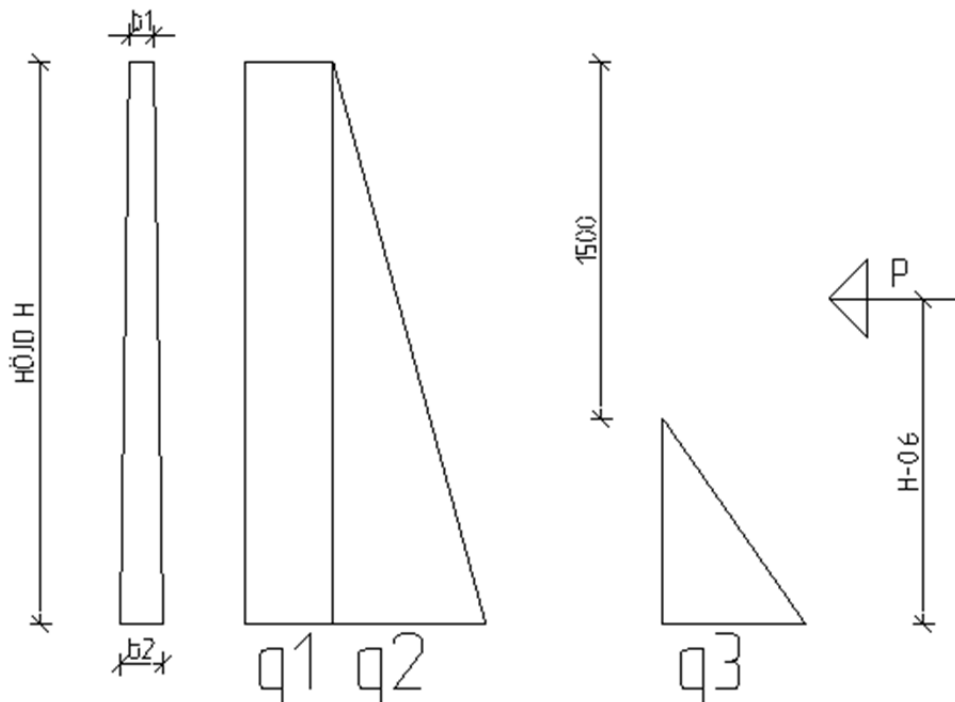
$$q_{hk} = 7,5 + 2,5 * z + 7,5 (z - z_0) \quad \text{kN/m}^2 \text{ för } z_0 < z < 4 \text{ m}$$

där

$z$  avståndet från färdigpackad överyta (normalt siloväggens överkant) till nivån där trycket skall beräknas.

$z_0$  avståndet från färdigpackad överyta (normalt siloväggens överkant) till maximal nivån för pressaft. Sätts normalt till 1,5 m för plansilor med dräneringssystem.

Dessutom tillkommer 2 st punktlaster från packningsmaskinen om vardera  $0,1 * T$  kN, dock minst 6 kN, där  $T$  är packningsmaskinens totalvikt. Punktlasterna antas angripa på nivån  $z = 0,6$  m under ÖK med ett centrumavstånd av 2,5 m. Punktlasterna betraktas som variabla med  $\psi = 0$ .



Figur 14. Förenklad uppdelning laster på plansilovägg enligt JBR (SJV, 1995).

Beräkning enligt JBR (SJV, 1995) utförs med följande antaganden:

- Två punktlaster á  $0,1 * \text{Egenvikt packningsmaskin}$
- c/c 2,5 m mellan punktlasterna
- Angripande 0,6 m ifrån plansiloväggens övre kant,
- Lastspridningsbredd  $\geq 1,0$  m
- Lastspridning i plansilo vägg 1:1
- Överlappande lastspridning är ej tillåten

Tabell 2. Momentberäkning enligt JBR, utförd för var 0,25 m silovägghöjd med avseende på lastuppdeleningen i figur 14 och med ovanstående antagande för packningsmaskin.

Ensilage	Moment			Packn.maskin			Ensilage huvudlast 1,3*E	Packn.maskin huvudlast 1,3*P+1,0*E	Största moment
X m	q1 kNm/m	q2 kNm/m	q3 kNm/m	M <sub>k,tot</sub> kNm/m	Lastbredd <sup>1</sup> m	M <sub>k,tot</sub> kNm/m	M <sub>d,tot</sub> kNm/m	M <sub>d,tot</sub> kNm/m	M <sub>d,tot</sub> kNm/m
0,00	0,00	0,00		0,00			0,0		0,0
0,25	0,23	0,01		0,24			0,3		0,3
0,50	0,94	0,05		0,99			1,3		1,3
0,60	1,35	0,09		1,44	1,00	0,00	1,9	1,4	1,9
0,75	2,11	0,18		2,29	1,00	1,65	3,0	4,4	4,4
1,00	3,75	0,42		4,17	1,00	4,40	5,4	9,9	9,9
1,25	5,86	0,81		6,67	1,30	5,50	8,7	13,8	13,8
1,35	6,83	1,03		7,86	1,50	5,50	10,2	15,0	15,0
1,50	8,44	1,41	0,00	9,85	1,80	5,50	12,8	17,0	17,0
1,75	11,48	2,23	0,02	13,73	2,30	5,50	17,9	20,9	20,9
2,00	15,00	3,33	0,16	18,49	2,65	5,81	24,0	26,0	26,0
2,25	18,98	4,75	0,53	24,26	2,90	6,26	31,5	32,4	32,4
2,50	23,44	6,51	1,25	31,20	3,15	6,63	40,6	39,8	40,6
2,75	28,36	8,67	2,44	39,47	3,40	6,96	51,3	48,5	51,3
3,00	33,75	11,25	4,22	49,22	3,65	7,23	64,0	58,6	64,0
3,25	39,61	14,30	6,70	60,61	3,90	7,47	78,8	70,3	78,8
3,50	45,94	17,86	10,00	73,80	4,15	7,69	95,9	83,8	95,9
3,75	52,73	21,97	14,24	88,94	4,40	7,88	115,6	99,2	115,6
4,00	60,00	26,67	19,53	106,20	4,65	8,04	138,1	116,6	138,1

<sup>1)</sup> Lastspridning 1:1, c/c 2,5 m

Tabell 3. Momentberäkning för Stadie 1 (inläggning) enligt nytt förslag och användande av Eurokoder (lastfallfaktorer enligt Eurokod), där beräkning baserar sig på partialkoefficienterna 1,5\*0,83/1,35\*0,83 för ensilage och 1,5\*0,83 för packningsmaskin.

Packningsmaskin (Q <sub>dyn</sub> )		Inläggning (Q <sub>stat</sub> )						Ensilage huvudlast 1,5*0,83*E	Packningsmaskin huvudlast 1,5*0,83*P+1,35*0,83*E
		q(x)=4+3*X							
X m	Lastbredd m	M <sub>k,tot</sub> kNm/m	q1 kPa	q2 kPa	M <sub>k,q1</sub> kNm/m	M <sub>k,q2</sub> kNm/m	M <sub>k,tot</sub> kNm/m	M <sub>d,tot</sub> kNm/m	M <sub>d,tot</sub> kNm/m
0,00			4,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0
0,25			4,00	0,75	0,13	0,01	0,13	Ointressant!	0,1
0,50	1,00	0,00	4,00	1,50	0,50	0,06	0,56		0,6
0,60	1,00	1,65	4,00	1,80	0,72	0,11	0,83		3,0
0,75	1,00	4,13	4,00	2,25	1,13	0,21	1,34		6,7
1,00	1,00	8,25	4,00	3,00	2,00	0,50	2,50		13,1
1,25	1,50	8,25	4,00	3,75	3,13	0,98	4,10		14,9
1,35	1,70	8,25	4,00	4,05	3,65	1,23	4,88		15,8
1,50	2,00	8,25	4,00	4,50	4,50	1,69	6,19		17,2
1,75	2,35	8,78	4,00	5,25	6,13	2,68	8,80		20,8
2,00	2,60	9,52	4,00	6,00	8,00	4,00	12,00		25,3
2,25	2,85	10,13	4,00	6,75	10,13	5,70	15,82		30,4
2,50	3,10	10,65	4,00	7,50	12,50	7,81	20,31		36,1
2,75	3,35	11,08	4,00	8,25	15,13	10,40	25,52		42,5
3,00	3,60	11,46	4,00	9,00	18,00	13,50	31,50		49,6
3,25	3,85	11,79	4,00	9,75	21,13	17,16	38,29		57,6
3,50	4,10	12,07	4,00	10,50	24,50	21,44	45,94		66,6
3,75	4,35	12,33	4,00	11,25	28,13	26,37	54,49		76,5
4,00	4,60	12,55	4,00	12,00	32,00	32,00	64,00		87,4

Tabell 4. Visar momentberäkning för Stadie 2, (bruksskedet) med användande av Eurokoder samt jämförelse med Stadie 1 och JBR i tabellerna 2 respektive 3.

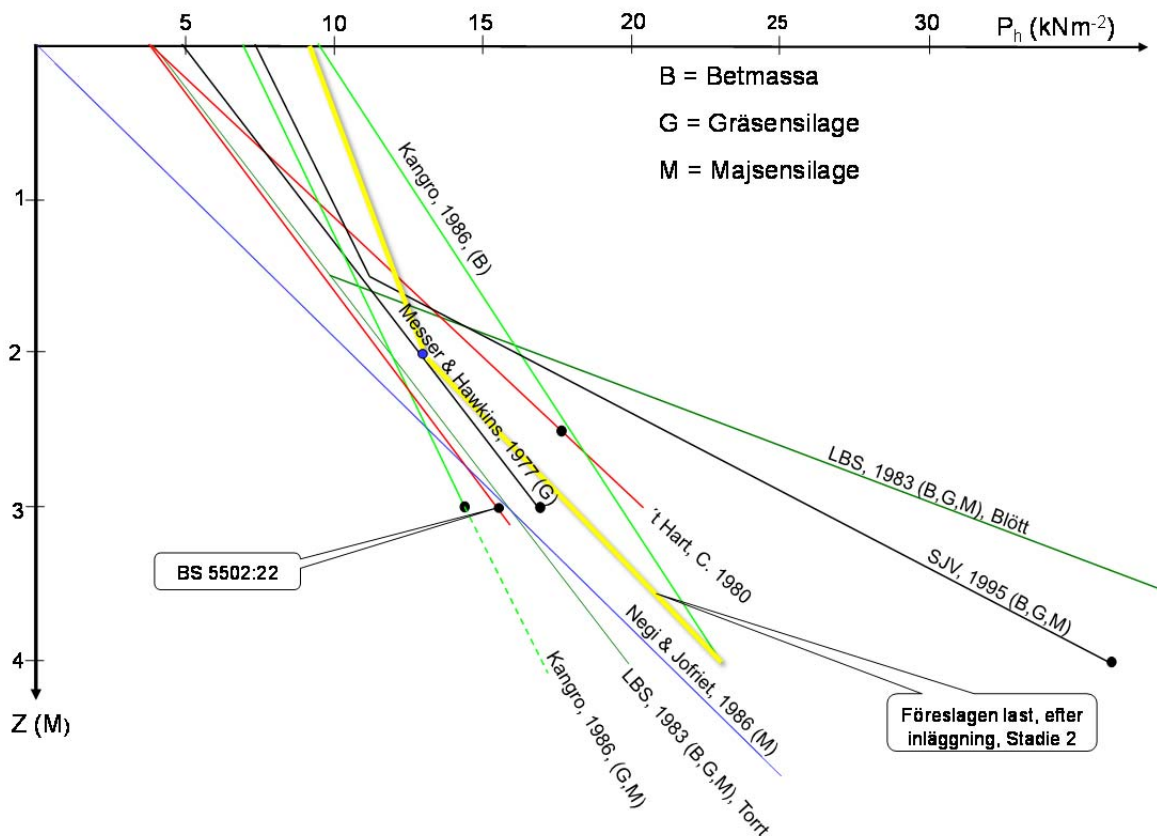
Q efter ett tag (Q <sub>stat</sub> + Pressvatten) (Jämför figur 12)						Ensilage huvudlast	Dimensionerande last är <b>max</b> av Ensilage h-last och Packmaskin h-last	Jämförelse mot JBR
q(x) = 9+2*X, X<2 q(x) = 13+5(X-2), 2<X<4						1,5*0,83*E		
X m	q1 kPa	q2 kPa	q3 kPa	q4 kPa	M <sub>k</sub> tot kNm/m	M <sub>d</sub> tot kNm/m	M <sub>d</sub> tot kNm/m	
0,00	9,00		0,00		0,0	0,0	0,0	0%
0,25	9,00		0,50		0,3	0,3	0,3	2%
0,50	9,00		1,00		1,2	1,3	1,3	2%
0,60	9,00		1,20		1,7	1,9	3,0	(inlägg)
0,75	9,00		1,50		2,7	3,0	6,7	60%
1,00	9,00		2,00		4,8	5,4	13,1	50%
1,25	9,00		2,50		7,7	8,6	14,9	33%
1,35	9,00		2,70		9,0	10,1	15,8	8%
1,50	9,00		3,00		11,3	12,6	17,2	5%
1,75	9,00		3,50		15,6	17,4	20,8	1%
2,00	9,00		4,00		20,7	23,2	25,3	0%
2,25	9,00	4,00		1,25	26,6	29,8	30,4	-3%
2,50	9,00	4,00		2,50	33,4	37,4	37,4	(pressv)
2,75	9,00	4,00		3,75	41,2	46,1	46,1	-6%
3,00	9,00	4,00		5,00	50,0	56,0	56,0	-8%
3,25	9,00	4,00		6,25	60,0	67,2	67,2	-10%
3,50	9,00	4,00		7,50	71,1	79,7	79,7	-12%
3,75	9,00	4,00		8,75	83,5	93,6	93,6	-15%
4,00	9,00	4,00		10,00	97,3	109,1	109,1	-17%
								-19%
								-21%

### 5.2.3 Slutsatser Brottgränstillstånd

Enligt utförd jämförelse mellan olika standarder, enligt tabell 5, framgår att JBR (SJV, 1995) ger betydligt större lastvärden än övriga jämförda normer. Framförallt har belastningen ”stuckit” iväg på plansilor med vägghöjd över 3 m. Att tillägga är att få försök har genomförts på plansilor högre än 3 m, därför har en konservativ betraktelse utnyttjats. I figur 15 ses att föreslagna värden väl sammanfaller med övriga jämförda normer.

Tabell 5. Jämförelse mellan utfallet av olika standarder för 2-4 m vägghöjd hos plansilo.

Höjd plansilo	Eurokoder $M_d$	JBR $M_d$	Förändring
2,0	25,3	26,0	-3 %
3,0	56,0	64,0	-12 %
4,0	109,1	138,1	-21 %



Figur 15. Figuren visar hur det nya beräkningsförslaget för last efter inläggning överensstämmer med övriga anvisningar och rekommendationer för siloväggtryck. Vertikala axeln (z) anger avstånd (meter) under ensilagets överyta; horisontella axeln ( $P_h$ ) anger horisontaltryck ( $\text{kN/m}^2$ ) mot siloväggen som uppmätts eller anges i olika anvisningar.

### 5.3 Bruksgränstillstånd, grundläggning och olyckslast

#### 5.3.1 Bruksgränstillstånd

Enligt JBR (SJV, 1995) så finns inga krav gällande bruksgränstillstånd, men med tanke på syrabelastning på betongen bör kriterier ställas upp även för bruksgränstillstånd i en ny standard.

Tabell 6. Nu gällande exponeringsklasser för syra och plansilo (SIS, 2012).

Plansilovägg	
- Utan syratålig behandling	XA2, XC4, XF1
- Med syratålig behandling, ej utsatt för klorider	XC4, XF1

För att den syratåliga behandlingen (skydd av betong och armering) skall kunna vara verksam bör tillåten sprickvidd begränsas.

XC4 ger en tillåten maximal sprickvidd motsvarande 0,4 mm, för konstruktion med livslängd på 50 år. Denna sprickvidd får anses vara för stor även om plansiloväggen

behandlas och endast har en livslängd på 20 år. Orsaken är att sprickorna blir så stora att behandlingen inte ger någon effekt utan syran får fullt tillträde till armeringen.

Vattentäta konstruktioner har tidigare ansetts vara sådana konstruktioner där sprickvidden begränsats till 0,2 mm, en sprickvidd som anses något för tuff för denna typ av produkt med en livslängd på 20 år. Förslagsvis sätts max sprickvidd till 0,3 mm.

I Bruksgränstillstånd finns det tre stadier:

- Karakteristisk (irreversibelt) – permanent skada
- Frekvent (reversibelt) – tillfällig olägenhet
- Kvasi-permanent (långtidseffekter och effekter rörande bärverkets utseende)

Då plansilon lastas in och ur under året så är inte Kvasi-permanent aktuellt. Om sprickor uppstår så är konstruktionen sprucken, även efter avlastning, således är inte Frekvent tillstånd aktuellt heller då sprickbildningen inte är reversibel.

Förslagsvis dimensioneras plansiloväggarna för Karakteristiskt tillstånd, ekvation 6.14b enligt Eurokod (2004), med ett krav på max sprickvidd  $w_k = 0,3$  mm, där hänsyn skall tas till eventuella Geotekniska laster.

Farligast last enligt Stadie 1 respektive 2 skall användas i respektive snitt, vilket gäller både för Brott- och Bruksgränskontroller.

Tabell 7. Jämförelse mellan JBR (SJV, 1995) och Eurokoder i Bruksgränstillstånd.

Höjd plansilo	Eurokoder $M_d$	JBR <sup>1</sup> $M_d$	Förändring
2,0	21,5	24,3	-12%
3,0	50,0	56,5	-12%
4,0	97,3	114,2	-15%

<sup>1)</sup> JBR-värden ovan motsvarar Lastkombination 8 enligt BKR (1,0 \* Packningsmaskin + 1,0 \* 1,0 \* Ensilage) (Boverket, 2010).

Tabell 8. Föreskrivna lastkombinationer 8 och 9, tillhörande partialkoefficient  $\gamma_f$  och lastvärden för en konstruktion i bruksgränstillstånd (Boverket, 2010, tabell 2:322c).

Last	Lastkombination	
	8	9
<i>Permanent laster <math>G_k</math></i>	1,0 $G_k$	1,0 $G_k$
<i>Variabel last</i>		
En variabel last med karakteristiskt värde $Q_k$	1,0 $Q_k$	-
Övriga variabla laster med vanligt värde $\psi Q_k$	1,0 $\psi Q_k$	-
Alla variabla laster med vanligt värde $\psi Q_k$	-	1,0 $\psi Q_k$

Enligt JBR (SJV, 1995) är både Ensilage och Packningsmaskin att betrakta som Variabla laster. Eurokodvärden motsvarar (Karakteristisk lastkombination):

1,0 \* Permanent + 1,0 \* Packningsmaskin, där valt värde är max av Stadie 1 respektive 2.

### 5.3.2 Slutsats Bruksgränstillstånd

På höjderna 2 och 3 m så minskar momenten med ca 12 % och på 4 m plansilo så minskar det med 15 %.

### 5.3.3 Grundläggning

Grundläggning förutsätts ske i Geoteknisk kategori 1, vid undergrund av icke friktionsmaterial förutsätts Geoteknisk kategori 2.

Vid dimensionering gällande grundläggning (fundament) så skall STR/EQU Uppsättning A ekvation 6.10 enligt Eurokod 0 användas vid kontroll av stjälpning där ensilaget betraktas som ”gynnsam” (mothållande). Hänsyn skall tas till eventuella Geotekniska laster enligt Uppsättning C.

Då plansilovägg och bottenplatta samverkar och då del av ensilaget utnyttjas som mothåll vid kontroll av stjälpning måste bottenplattans bärförmåga och anslutning till plansilovägg säkerställas.

Vid dimensionering gällande grundläggning (fundament) så skall STR/GEO Uppsättning B ekvation 6.10a och b enligt Eurokod 0 användas vid kontroll av grundpåkänning. Hänsyn skall tas till eventuella Geotekniska laster enligt Uppsättning C.

Differenssättning till följd av undergrunden behöver inte kontrolleras om grundläggning sker med styv och lastfördelande kantbalk.

### 5.3.4 Olyckslast

Överstörtningsskydd skall finnas, kontroll för samtidig inverkan av påkörning, packningsmaskin, ensilage och eventuell motfyllnad skall ske för exceptionell dimensioneringssituation, ekvation 6.11a och b enligt Eurokod 0. Med  $\psi_i = 1,0$  för packningsmaskinen och en påkörningslast om 4 kN/m, där  $\psi_i = 1,0$ .

## 5.4 Förslag på beräkningavsnitt till plansilostandard

### 5.4.1 Laster och lastfall för plansilo

Anvisningarna gäller för dimensionering av plansilor för ensilering av gräs, majs och liknande material. Anvisningarna är baserade på försök genomförda på plansilor upp till 4 m höjd. Anvisningarna behandlar endast laster från packat material. Hänsyn skall också tas till övriga laster som kan påverka plansilokonstruktionen såsom egentygnd, vind, maskiner för packning, fordonstrafik utanför plansilo och jordtryck.

Ensilage betraktas som en Permanent last.

Packningsmaskinen betraktas som en Variabel last,  $\psi_i = 1,0$ .

Jordtryck på plansilovägg betraktas som Geoteknisk last (Permanent).

Last av fordon utanför plansilo betraktas som Geoteknisk last (Variabel),  $\psi_i = 1,0$ .

Laster på plansilovägg:

Horisontaltryck,  $q_{hk}$  på plansilovägg delas upp i två lastfall som ej skall kombineras enligt nedan:

## 1) Lastfall vid inläggning

$$q_{hk} = 4,0 + 3 \cdot z \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{Last orsakad av ensilage}$$

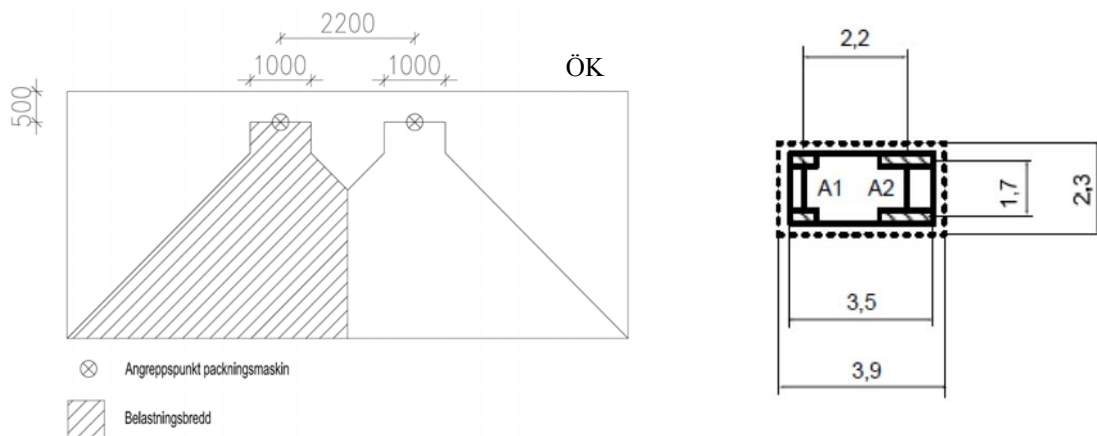
$$Q_{hk} = 0,15 \cdot T \geq 6 \quad [\text{kN}] \quad \text{Last orsakad av packningsmaskin}$$

där

$z$  avståndet från färdigpackad överyta (normalt plansiloväggens ovankant) till nivån för dimensioneringssnittet där trycket skall beräknas

$T$  är packningsmaskinens totala vikt (kN)

Två punktlaster,  $Q_{hk}$ , från packningsmaskin angiven ovan antas angripa plansiloväggen med c/c 2,2 m, se figur 14, angripande på nivån  $z = 0,5$ . Minsta spridningsbredd kan antas till 1,0 m och max lastspridning antas till 1:1. Överlappning av lastbredder är ej tillåten.



a) b)  
Figur 16. Lastspridning nedåt i ensilagemassan från packningsmaskin (a) med givna dimensioner hos packningsmaskin (b).

## 2) Lastfall efter inläggning

$$q_{hk} = 9 + 2 \cdot z \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{för } z \leq 2 \text{ m}$$

$$q_{hk} = 13 + 4 \cdot (z - 2) \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{för } 2 \text{ m} < z \leq 4 \text{ m}$$

där

$z$  avståndet från färdigpackad överyta (normalt plansiloväggens ovankant) till nivån för dimensioneringssnittet där trycket skall beräknas

Plansiloväggen skall i varje snitt dimensioneras för max lasteffekt enligt respektive lastfall ovan.

### 5.4.2 Bruksgränstillstånd

Kontroll av plansilon (vägg och bottenplatta och anslutningar däremellan) ska ske i bruksgränstillstånd. Maximal sprickvidd sätts till  $w_k = 0,3 \text{ mm}$  för karakteristisk lastkombination.



### 5.4.3 Grundläggning

Grundläggning förutsätts ske i Geoteknisk kategori 1. Vid undergrund av icke friktionsmaterial förutsätts Geoteknisk kategori 2.

Kontroll skall ske med avseende på stjälpning och undergrundens bärförmåga.

Då plansilovägg och bottenplatta samverkar och då del av ensilaget utnyttjas som mothåll (vertikalt tryck på bottenplatta) vid kontroll av stjälpning måste bottenplattans bärförmåga och anslutning till plansilovägg säkerställas.

Vertikaltryck på bottenplatta,  $q_{vk}$ .

$$q_{vk} = \gamma_k \cdot z$$
$$\gamma_k = 7,5 \quad [\text{kN/m}^3] \quad \text{för gräs- och majsensilage}$$

där  $\gamma_k$  är ensilagets karakteristiska tunghet i  $\text{kN/m}^3$  (utgående från Eurokod)

Kontroll av differenssättning till följd av undergrunden behöver inte utföras om grundläggning sker med styv och lastfördelande kantbalk.

### 5.4.4 Olyckslast

Överstörtningsskydd skall finnas, kontroll för samtidig inverkan av påkörning, packningsmaskin, ensilage och eventuell motfyllnad skall ske för exceptionell dimensioneringssituation.

$\psi_i = 1,0$  för packningsmaskinen och påkörningslast  $q_{hk}=4 \text{ kN/m}$ ,  $\psi_i = 1,0$ .

### 5.4.5 Jordtryck och trafiklast

Yttre last på marken skall alltid antas uppgå till minst  $2 \text{ kN/m}^2$ , variabel last med  $\psi_i = 1,0$  eller med förekommande trafiklast.

---

## 6 REFERENSER

- BSI (1993). BS 5502 – 22: Buildings and structures for agriculture. Code of practice for design, construction and loading. British Standard Institute, London, United Kingdom.
- Bastiman, B. 1976. Factors affecting silage effluent production. *Experimental Husbandry*, 31, 40-46.
- Boverket. 2010. Boverkets konstruktionsregler, BKR13. Boverket.
- Eurokod. 2004. Eurokod 0. Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Svensk standard, SS-EN 1990.
- Gruyaert, E., De Belie, N., Matthys, S., Van Nuffel, A. & Sonck, B. 2007. Pressures and deformations of bunker silo walls. *Biosystems Engineering* 97 (2007) 61-74.
- Isaksson, T., Mårtensson, A. & Thelandersson S. 2010. Byggekonstruktion, baserad på Eurokod. ISBN 978-91-44-07030-8. Studentlitteratur AB, Lund, sid 72.
- Kangro, A. 1986. Load measurements in bunker silos for silage. Report 48. Swedish University of Agricultural Sciences, department of Agricultural Buildings, Lund.
- LBS. 1983. LALT-publikation 2 – Byggnadskonstruktioner. Lantbruksstyrelsens anvisningar för produktionsbyggnader inom lantbruks- och trädgårdsnäringen. Jönköping.
- Martens, P. 1993. Die Neufassung der DIN 11622 – Gärfuttersilos und Gütterbehälter. Proceedings of the Symposium Concrete for a Sustainable Agriculture. BIBM, Cembureau, ERMCO, CIGR. Bologna, Italy 21-23 April 1993.
- Messer, H. J. M. & Hawkins, J.C. 1977. The loads exerted by grass silage on bunker silo walls. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22 (4), 327-339.
- Negi, S. C. & Jofriet, J. C. 1986. Computer-aided prediction of silo-wall pressures. ASAE. Applied Engineering in Agriculture. Vol. 2(2) November 1986. St. Joseph, Michigan.
- Nilsson, L. 1982. Laster i ensilagesilor – Genomgång av litteratur och normer. (The loads in horizontal silos – a literature review of silo code design). Report 23. Swedish University of Agricultural Sciences, department of Agricultural Buildings, Lund.
- O'Donnell, C. 1993. A study of the effects of silage effluent on concrete. MEngSc thesis, National University of Ireland.
- SIS, 2012. Ekonomibygnader-Tillämpningar till Boverkets och Jordbruksverkets regler avseende utformning av ekonomibygnader för jordbruk, skogsbruk och trädgårdsnäring samt hästverksamhet. SIS-TS 37:2012. SIS Förlag AB. Stockholm.
- SJV (1995). Jordbruksverkets Bygg Råd (JBR). Jönköping.
- Sutter, A. 1955. Problems of waste effluent from silage. Project 307, OEEC, 74-82.
- Stewart, T. A. & McCullough, I. I. 1974. Silage effluent, quantities produced composition and disposal. *Agriculture in N. Ireland*, 48, 368-374.
- Van Nuffel, A., Vangeyte, J., Baert, J., Maertens, W. & Sonck, B. 2008. Is literature on the pressure on farm trench silos walls still accurate? Paper P-105 presented at AgEng 2008 International Conference on Agricultural Engineering, 23-25 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece.

- von Wachenfelt, H. & Nilsson, C. 2012. Beräkningsunderlag för hållfasthetsdimensionering av väggar till plansilor för ensilage – pressvattennivåer. (Design criteria for structural design of silage silo walls – silage juice levels). SLU, Lantbrukets byggnadsteknik, Alnarp. Intern rapport.
- 't Hart, C. 1980. Constructieve richtlijnen voor sleufsilo's voor de opslag van kuilvoer. (Constructive guidelines for horizontal silos for the storage of silage). PT Bouwkunde, Wegen- en Waterbouw, 35(10), 584-587.
- Zhao, Q. & Jofriet, J.C. 1991. Structural loads on bunker silo walls: Experimental study. Journal of Agricultural Engineering Research (1991) 50, 273-290.